

СТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СПЛАВЕ ЖС32ВИ

Попов Н.А.

Руководитель – д.т.н. Лесников В.П.

УГТУ-УПИ, г. Екатеринбург.

Отечественный жаропрочный никелевый сплав II поколения для направленной кристаллизации ЖС32ВИ был создан ФГУП «ВИАМ» значительно раньше зарубежных аналогов и среди сплавов этого класса является наиболее жаропрочным. Химический состав сплава приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Среднее содержание легирующих элементов в сплаве ЖС32ВИ, масс. %.

Ni	Cr	Co	Mo	W	Re	Nb	Ti	Al	Ta	C
Основа	4,9	9,0	1,0	8,5	4,0	1,6	-	5,9	4,0	0,15

Цель настоящей работы – исследование структурных и фазовых превращений в сплаве ЖС32ВИ в процессе нагревов и после испытаний на промышленном двигателе.

Формирование ячеисто-дендритной структуры монокристаллов сплава ЖС32ВИ происходит в интервале температур ликвидуса (1397°C) и солидуса (1315°C). Дендритное строение монокристаллов приводит к появлению малоугловых границ между отдельными колониями или индивидуальными дендритами. Предельная разориентация между отдельными дендритами или их колониями не должна превышать 5...8°. Микроструктура литого нетермообработанного сплава ЖС32ВИ состоит из γ – твердого раствора, упрочняющей γ' [Ni₃(Al, Ti)] фазы, карбидной (типа MeC) фазы и эвтектической ($\gamma+\gamma'$) – фазы.

Исследование калориметрических эффектов (ДСК) показало, что интенсивное растворение упрочняющей γ' - фазы в сплаве начинается при 1258 °С, достигает максимальной скорости при 1280 °С, а при T = 1300 °С сплав переходит в однофазное состояние γ – твердого раствора.

В процессе гомогенизации при 1230...1250 °С происходит значительное выделение и растворение карбидов, а в интервале температур 1240...1250 °С выявляется сильная неоднородность γ' - фазы в сплаве.

При охлаждении образцов в температурном интервале 1272...1200 °С наблюдается интенсивная экзотермическая реакция (выделение энергии), которая свидетельствует о начале распада γ – твердого раствора с образованием

γ' - фазы. Максимальная скорость выделения γ' - фазы соответствует 1232°C, а переход сплава в многофазное состояние заканчивается при 1100°C.

Более стабильные и высокие прочностные характеристики сплава ЖС32ВИ как при 20°C, так и при 1000°C, достигаются после гомогенизации при 1270°C. После гомогенизации выше 1290°C длительная прочность образцов была ниже стандартной ($\tau_{p.ст.} = 40$ ч).

Таблица 2 – Результаты механических испытаний сплава ЖС32ВИ

Температура гомогенизации, °C	σ_B , МПа	δ , %	τ_p , ч при $t_{исп} = 1000^\circ\text{C}$, $\sigma = 275$ МПа
1250	900	13,6	45,6 - 59,8 (52,8)
1270	915	15,1	50,5 - 65,8 (58,1)
1285	890	18,8	29,8 - 57,1 (42,0)
1300	865	6,8	29,6 - 51,3 (31,4)
* приведены минимальные, максимальные и средние (в скобках) значения времени до разрушения τ_p .			

Для сплава ЖС32ВИ после ТВО характерна (рисунок 1):

- однородная по размеру и форме частиц γ' -фазы ($\gamma+\gamma'$) структурная составляющая в дендритной ячейке, форма γ' -частицы близка к кубоидной с ребром куба $\sim 0,5$ мкм;
- вдоль границ дендритных ячеек располагается ($\gamma+\gamma'$) структурная составляющая с типичным размером γ' -частиц ~ 2 мкм;
- в межсосновых пространствах присутствуют кристаллы эвтектической $\gamma'_{эвт}$ -фазы, размеры которых изменяются в широких пределах;
- в межсосновых пространствах присутствуют эвтектические выделения первичных карбидов (Ta, Nb)C.

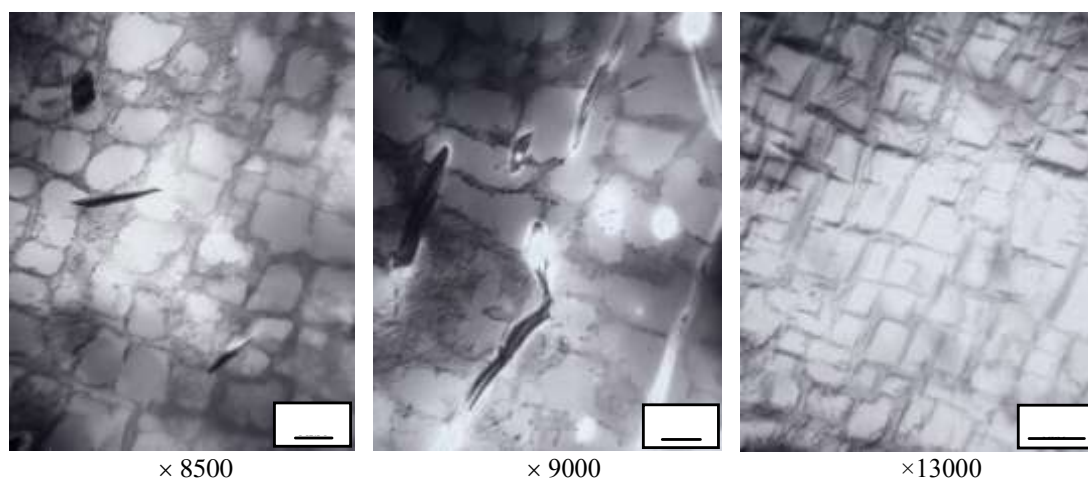


Рисунок 1. Тонкая структура сплава ЖС32ВИ после ТВО

Определенный коэффициент ликвации (K_L) показывает, что при $K_L > 1$ легирующие элементы сплава W, Re, Cr, Co концентрируются в осях

дендритов, а при $K_d < 1$ легирующие элементы Al, Ti, Ta, Nb – в межосном пространстве и глобулах (таблица 3).

Таблица 3. Содержание элементов в различных точках дендритной ячейки сплава

Легирующий элемент	Al	Ni	W	Re	Cr	Co	Ta
Содержание в осях дендритной ячейки $C_{o.d.}$, масс. %	6,37	62,19	6,62	4,33	4,79	9,18	3,61
Содержание в межосном пространстве $C_{м.п.}$, масс. %	7,62	64,54	7,57	0,8	1,54	6,72	4,92
Коэф. ликвации элемента, $K_d = C_{o.d.}/C_{м.п.}$	0,84	0,96	1,14	5,41	3,11	1,36	0,73
Содержание в крупных глобулах эвт. образований	7,82	68,36	4,41	0,81	1,76	7,56	6,36
Коэф. Распределения $K_p = C_{o.d.}/C_{эвт.обр}$	0,81	0,91	1,95	5,35	2,72	1,21	0,57

Таким образом, существующий режим ТВО после отливки монокристалльного сплава ЖС32ВИ не приводит к полному устранению ликвационной неоднородности сплава. Для реальных лопаток ТВД и не требуется полного устранения дендритной ликвации, т.к. при гомогенизации больше 4 часов сопротивление сплава ползучести повышается очень незначительно.

Проведено исследование рабочей лопатки 2 ступени ТВД из сплава ЖС32ВИ с промышленного двигателя с наработкой 15000 часов. Мониторинг структуры и состава сплава осуществляли в следующих сечениях лопатки: замок, среднее сечение пера, верхнее сечение пера, бандажная полка (рисунок 2). На основании проведенных исследований тонкой структуры и фазового состава сплава в различных сечениях лопатки построен график изменения температуры по высоте рабочей лопатки при эксплуатации на двигателе.



Рисунок 2. Микроструктура р.л. ТВД II ступени из сплава ЖС32ВИ после эксплуатации в течение 15000 часов